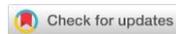


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-31-57



Ссылки для цитирования:

Савин И.Ю., Бербеков С.А., Тутукова Д.А. Комплексная оценка неоднородности почвенного покрова по состоянию посевов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 113. С. 31-57. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-31-57

Cite this article as:

Savin I.Y., Berbekov S.A., Tutukova D.A. Comprehensive assessment of soil heterogeneity by crop canopy status, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 113, pp. 31-57, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-31-57

Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке Программы развития научных центров мирового уровня (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2022-321).

Acknowledgments:

The research was supported by the Program for the Development of World-class Scientific Centers (agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № 075-15-2022-321).

Комплексная оценка неоднородности почвенного покрова по состоянию посевов

© 2022 г. И. Ю. Савин^{1,2*}, С. А. Бербеков³, Д. А. Тутукова⁴

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

²Российский университет дружбы народов, Россия,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

³Научно-образовательный центр КБЦН РАН,
360002, Кабардино-Балкарская республика, Долинск, ул. Балкарова, д. 12.

⁴Институт сельского хозяйства –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН,
360002, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Кирова, д. 224.

Поступила в редакцию 13.09.2022, после доработки 31.11.2022,
принята к публикации 27.12.2022

Резюме: Одним из самых важных направлений прикладного использования знаний о почвах является решение сельскохозяйственных задач. От почвенных условий сильно зависит урожайность сельскохозяйственных культур и кормовых угодий. Поэтому точная информация о почвах является важным компонентом информационного обеспечения сельскохозяйственного производства. В качестве основы для получения данных о почвах земельного участка используют почвенную карту. Но информация на почвенной карте во многих случаях не отражает пространственное варьирование всех агрономически важных свойств почв, что приводит к схематичности и неточности анализа почвенной информации при принятии управленческих решений. Предложен новый подход к комплексной оценке неоднородности почвенного покрова полей по состоянию посевов, базирующийся на детальном анализе состояния посевов в севообороте по многолетним архивам спутниковых данных. Карты неоднородностей почвенного покрова отдельных полей, получаемые на основе предложенных подходов, существенно отличаются от традиционно составленных почвенных карт и более точно, с точки зрения агроэкологических требований посевов сельскохозяйственных культур, отражают пространственные неоднородности свойств почв, определяющих их актуальное плодородие.

Ключевые слова: агроэкологическая оценка почв, неоднородности посевов, спутниковый мониторинг посевов, почвенная карта.

Comprehensive assessment of soil heterogeneity by crop canopy status

© 2022 I. Yu. Savin^{1,2*}, S. A. Berbekov³, D. A. Tutukova⁴

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru.

²Institute of Environmental Engineering of RUDN University,
8/2 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation.

³Scientific-Educational Center of KBCN RAS,
2 Balkarova Str., Dolinsk 360002, Kabardino-Balkarian Republic,
Russian Federation.

⁴Institute of Agriculture – Branch of Kabardino-Balkarian
Scientific Center RAS,

*224 Kirova Str., Nalchik 360002, Kabardino-Balkarian Republic,
Russian Federation.*

Received 13.09.2022, Revised 31.11.2022, Accepted 27.12.2022

Abstract: One of the most important applications of soil knowledge is in agricultural processes and crop production. Crop and forage yields strongly depend on soil conditions. Therefore, accurate soil information is an important component of informational support for agricultural production. A soil map is used as the basis for obtaining the soil data of a land plot. But the information on the soil map in many cases does not reflect the spatial variation of all agronomically important properties of soils, which leads to oversimplified and inaccurate analysis of soil information when making management decisions. A new methodology of applied soil mapping for agricultural purposes, based on a detailed analysis of the state of crops in a crop rotation with the use of multi-year satellite data archives, is proposed. The maps of soil inhomogeneity of individual fields, obtained on the basis of the proposed approaches, differ significantly from the traditionally developed soil maps and more accurately reflect the spatial heterogeneity of soil properties, predetermining their actual fertility.

Keywords: agro-ecological assessment of soils, crop heterogeneity, satellite monitoring of crops, soil map.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых важных направлений прикладного использования знаний о почвах с момента становления почвоведения как науки является решение сельскохозяйственных задач. От почвенных условий сильно зависит урожайность сельскохозяйственных культур и кормовых угодий ([Oldfield et al., 2019](#)), а также сама возможность их возделывания в том или ином регионе ([The Aims of Land Evaluation, 2019](#)). Поэтому точная информация о почвах является важным компонентом информационного обеспечения сельскохозяйственного производства и включена во многие информационно-аналитические системы ([Козубенко, 2018](#)). В качестве основы для получения данных о почвах земельного участка используют почвенную карту. Но информация на почвенной карте во многих случаях не отражает пространственное варьирование всех агрономически важных свойств почв, а показывает лишь выделы почв в той или иной классификации или их комбинаций

([Савин, 2016](#); [2020](#)). Из названия почв в почвенной классификации можно в обобщенном виде получить информацию о свойствах почв (но не обо всех агрономически важных), так как практически все свойства почв так или иначе коррелируют друг с другом ([Lal, 2014](#); [Rabot et al., 2018](#)). На этом подходе построены практически все методы агроэкологической оценки почв как в России ([Методическое руководство..., 2005](#)), так и за рубежом ([Manikandan et al., 2013](#)). Но их использование приводит к схематичности и неточности анализа почвенной информации в процессе принятия управленческих решений при возделывании сельскохозяйственных культур ([Савин, 2020](#)). Подобные подходы были предложены еще во времена В.В. Докучаева ([Докучаев, 1877](#)) и нуждаются в модернизации и детализации с учетом последних научных достижений в области цифрового картографирования и пространственного моделирования почв ([Цифровая почвенная картография..., 2012](#)) и развития дистанционных методов их детектирования и мониторинга ([Савин, Симакова, 2012](#)).

В данной статье изложен новый подход к оценке почвенных неоднородностей поля на основе анализа многолетних архивов спутниковых данных.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для иллюстрации предложенной методологии использовались тестовые поля, расположенные в разных природных зонах России и с разным набором возделываемых культур.

Первое поле расположено в Ленинградской области (Меньково – 59°25'23.01" N, 30°01'23.25" E, площадью 26 га), второе – в Тульской области (Стрелецкое – 53°48'25.65" N, 36°45'46.24" E, площадью 63 га), третье – в Кабардино-Балкарской республике (Белокаменское – 43°53'08.05" N, 43°01'24.64" E, площадью 31 га) (рис. 1).

На поле “Меньково” преобладают дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы в разной степени переувлажненные и смытые. В состав севооборота на поле входят озимая пшеница, яровой ячмень, картофель, однолетние травы.

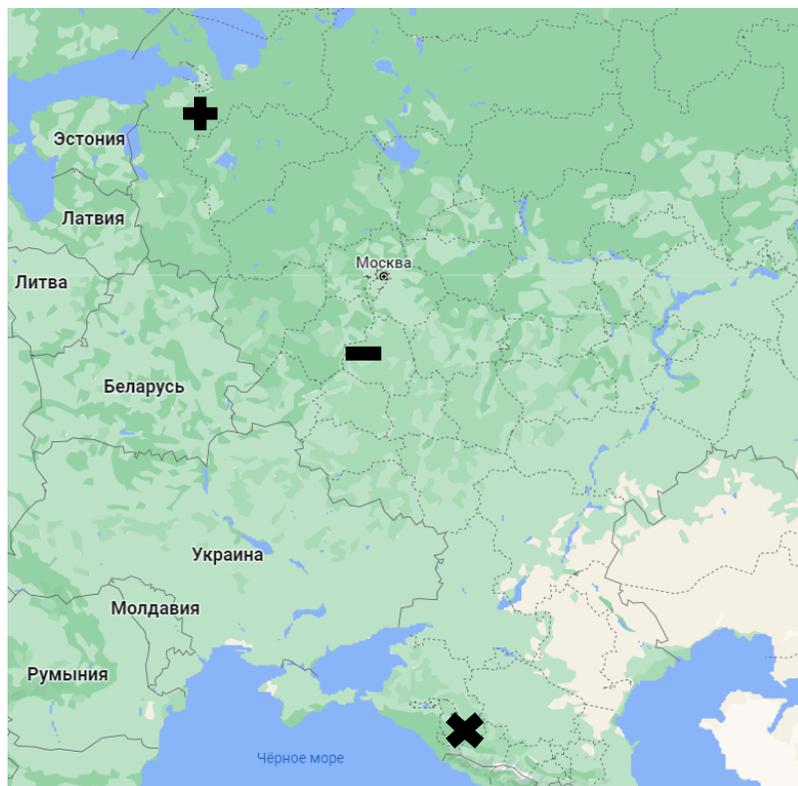


Рис. 1. Расположение тестовых участков (+ – Меньково, - – Стрелецкое, х – Белокаменское).

Fig. 1. Layout of test sites (+ – Menkovo, - – Streletsкое, х – Belokamenskoe).

На поле “Стрелецкое” – серые лесные тяжелосуглинистые почвы, которые в разной степени эродированы на склонах. В состав севооборота на поле входят озимая пшеница, черный пар, рапс, яровая пшеница, гречиха.

На поле “Белокаменское” преобладают горные черноземы типичные малогумусные, среднемощные, слабдефлированные, местами слабосмытые среднеглинистые. Основными возделываемыми культурами на поле являются картофель, кукуруза на силос,

озимая пшеница и ячмень.

Для анализа цвета открытой поверхности почв использовались спутниковые данные Sentinel-2 за последние 7 лет. Эти же данные применялись для анализа неоднородностей посевов на тестовых полях. В качестве индикатора неоднородностей посевов служил вегетационный индекс NDVI ([Kriegler et al., 1969](#)), который на протяжении уже более 40 лет является основным для многих систем спутникового мониторинга растительности ([Толпин и др., 2010](#); [Becker-Reshef et al., 2010](#); [Wu, 2014](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный подход

Для повышения точности информации о почвах конкретного земельного участка, необходимой для принятия управленческих решений при возделывании сельскохозяйственных культур, целесообразно отказаться от отражения на карте выделов почв в какой-либо базовой классификации (классификационные выделы почв). Использование традиционной почвенной карты, на которой отражены классификационные выделы почв, приводит к неточным и схематичным результатам. Это связано с тем, что классификационно важные свойства почв базовой классификации часто или не важны для оценки качества почв для сельскохозяйственных целей, или представлены не в тех градациях, и, наоборот, важные для роста сельскохозяйственных растений свойства почв часто не важны для базовой классификации почв. Например, для целей классификации черноземов важно наличие в профиле почв карбонатных новообразований и глубина их залегания, а для многих возделываемых сельскохозяйственных культур это свойство почв не имеет практически никакого значения (то есть, не сказывается на их урожайности). С другой стороны, например, актуальное содержание питательных веществ – архиважная информация для выращивания сельскохозяйственных культур – на традиционных почвенных картах вовсе не отражается.

Следовательно, прикладная карта почв для земледельческих задач должна отражать пространственные неоднородности тех свойств почв, которые важны для решения именно этих задач.

На основе обобщения мирового опыта специалистами ФАО был определен список свойств почв, которые могут использоваться в качестве базовых для оценки их качества и пригодности для возделывания тех или иных сельскохозяйственных культур и которые могут лимитировать сельскохозяйственное производство ([A framework for land..., 1976](#)). Данный список, конечно же, не является исчерпывающим и может быть усовершенствован. Он отражает уровень научных знаний в области влияния свойств почв на развитие сельскохозяйственных растений на момент создания списка. Но, учитывая то, что практически все свойства почв связаны друг с другом, его можно рассматривать как набор основных индикаторных или лимитирующих свойств почв для роста сельскохозяйственных культур.

Необходимо также отметить, что создание почвенной карты, отражающей пространственное варьирование каждого из этих свойств почв, может быть осуществлено традиционно, методом построения картограмм свойств, используя в качестве основы традиционно составленную почвенную карту. Но в этом случае, как отмечалось выше, не все нужные свойства могут быть “выведены” из классификационного положения почв, отраженных на традиционно составленной почвенной карте. Или некоторые свойства будут “выведены” с большими неточностями. В результате можно получить карту, которая будет неточной или слишком схематичной для решения сельскохозяйственных задач.

Альтернативным и более логичным методом является картографирование каждого из лимитирующих почвенных свойств по отдельности, независимо друг от друга и от классификационных выделов почв и затем, пересечением этих карт отдельных свойств почв, например в ГИС, получать некие элементарные выделы, однородные по своим лимитирующим почвенным свойствам. Построенная подобным образом почвенная карта должна теоретически в гораздо большей степени отражать географию лимитирующих свойств почв, чем традиционно составленная почвенная карта. Но на практике мы сталкиваемся с проблемой отсутствия надежных и оперативных методов картографирования отдельных (нужных для решения нашей задачи) свойств почв. Решать задачу картографирования отдельных свойств почв можно, отказавшись

от подходов факторного картографирования почв и переходя на методы, основанные на большом количестве точек полевого опробования с последующей геостатистической интерполяцией (или пространственным моделированием) ([Савин, 2022](#)). Ограничением этих методов является большая трудоемкость, длительность и высокая затратность работ, что делает их применение на больших территориях практически невозможным.

Часть лимитирующих свойств почв может быть оперативно закартирована на основе использования данных дистанционного зондирования ([Ge et al., 2011](#)).

В таблице 1 приведен перечень основных лимитирующих рост сельскохозяйственных растений свойств почв и оценены возможности их спутниковой индикации по данным литературных источников.

Но на данном этапе развития дистанционных методов в почвоведении речь пока может идти лишь о некоторых свойствах пахотного горизонта почв ([Савин и др., 2019](#)), а не о свойствах всего потенциально корнеобитаемого слоя почв, что необходимо. В перспективе могут быть установлены связи между свойствами пахотного горизонта почв и свойствами нижележащих горизонтов, которые послужат основой для косвенного дистанционного детектирования и свойств почв нижележащих горизонтов.

На современном этапе информацию о свойствах корнеобитаемой толщи почв можно также получить косвенно, по характеру изображения растительности на данных дистанционного зондирования ([Serteser et al., 2008](#); [Fischer et al., 2019](#)). И данный подход представляется наиболее логичным. Если свойства корнеобитаемого слоя почв не лимитируют развитие сельскохозяйственных растений, то необходимости в их учете нет, так как они не влияют на урожайность.

Существующие на настоящий момент архивы спутниковых данных высокого разрешения (Landsat, Sentinel, 10–30 м) вполне позволяют оценить пространственные неоднородности растительности на конкретных полях в течение всего сезона вегетации за последние несколько десятков лет, что позволяет оценить неоднородности посевов разных культур всего используемого севооборо-

та, причем в разных метеорологических условиях (т. е. проследить за изменениями нескольких временных севооборотов на поле).

Таблица 1. Возможности картографирования отдельных свойств почв на основе дистанционных методов по прямым дешифровочным признакам
Table 1. Possibilities of mapping individual soil properties based on remote sensing methods by direct decoding features

№ п/п	Лимитирующее свойство почв (A framework for land evaluation..., 1976)	Возможность дистанционного картографирования	Примеры в научной литературе
1	Дренированность почв	Да	(Asgari et al., 2020)
2	Присутствие паводков и их продолжительность	Да	(Gleason, Durand, 2020)
3	Грансостав пахотного горизонта почв	Да	(Bousbih et al., 2019)
4	Содержание включений в пахотном горизонте	Да	(Karjalainen et al., 2021)
5	Содержание включений в подпахотном горизонте	Нет	-
6	Мощность мелкоземистой толщи почвы	Нет	-
7	Содержание карбонатов кальция в корнеобитаемом слое почв	Да, если они есть в поверхностном горизонте	(Qi et al., 2021)
8	Содержание гипса в корнеобитаемом слое почв	Нет	-

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

№ п/п	Лимитирующее свойство почв (A framework for land evaluation..., 1976)	Возможность дистанционного картографирования	Примеры в научной литературе
9	Емкость катионного обмена в корнеобитаемом слое почвы	Нет	-
10	Насыщенность основаниями в корнеобитаемом слое почвы	Нет	-
11	Величина pH в корнеобитаемом слое почвы	Нет	-
12	Содержание гумуса в корнеобитаемом слое почвы	Нет	-
13	Содержание воднорастворимых солей в корнеобитаемом слое почвы	Да, если они есть в поверхностном горизонте	(Wang et al., 2021)
14	Содержание поглощенного натрия в корнеобитаемом слое почвы	Нет	-
15	Уровень залегания грунтовых вод	Нет	-

Выявляемые таким образом неоднородности посевов могут индцировать не только о присутствии влияния лимитирующих свойств почв на поле. На появление неоднородностей могут оказывать влияние и другие факторы, не связанные со свойствами почв (болезни, вредители, неравномерность использования средств химизации и др.). Но устойчивость неоднородностей по-

сево́в одной культуры на поле в течение нескольких сезонов в большинстве случаев свидетельствует о влиянии именно почвенного фактора.

Таким образом, подобные неоднородности могут служить достаточно надежным индикатором присутствия в корнеобитаемом слое почв лимитирующих рост растений почвенных свойств.

Необходимо также отметить, что в большинстве случаев на конкретном поле в качестве лимитирующих свойств почв присутствуют лишь 2–3 из всех потенциально возможных, что значительно облегчает их детектирование и интерпретацию выявляемых неоднородностей.

Следовательно, подход для выявления и картографирования пространственных неоднородностей лимитирующих свойств почв (АНП – Агрономически важные Неоднородности Почвенного покрова) может быть представлен в следующем виде (рис. 2).

В основе подхода лежит использование многолетних архивов спутниковых данных. На первом этапе из архива отбираются все безоблачные и бесснежные атмосферно скорректированные изображения на территорию поля за последние 7 лет. Это позволяет оценить неоднородности изображения посевов и почв и особенности их варьирования в разных сезонах вегетации. Опыт подобных работ показывает, что для каждого сезона вегетации за последние годы может быть получено около 5–10 изображений в зависимости от региона исследований.

После этого все изображения делятся на две группы: с изображением открытой поверхности почв, и с изображением посевов. В качестве критерия для выделения изображений с открытой поверхностью почв достаточно использовать пороговое значение NDVI, которое подбирается экспертно и является индивидуальным для каждого поля.

Для изображений с открытой поверхностью почв проводится выделение контрастных неоднородностей. Наиболее простым способом является визуальное дешифрирование по монитору компьютера каждого из изображений с использованием в качестве подложки синтеза каналов спутниковых изображений в цветах близких к натуральным.

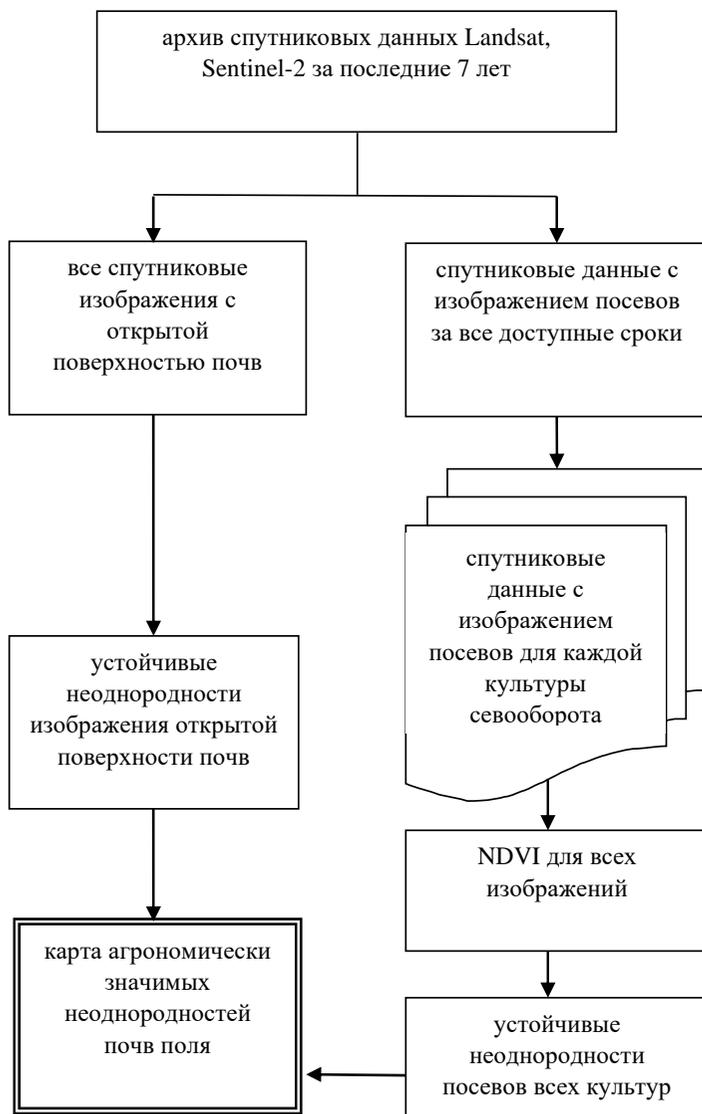


Рис. 2. Подход к построению карты АНП.

Fig. 2. Approach to the construction of ASSP (Agronomically Sound Soil Patterns) map.

Затем все результаты дешифрирования анализируются совместно для выявления зон устойчивых неоднородностей и зон неустойчивых неоднородностей. К зонам неустойчивой неоднородности относятся участки поля в случае неоднозначности их выявления на снимках разного срока (в одни сроки они выявляются, в другие – нет). Устойчивые неоднородности выявляются на всех анализируемых изображениях. Анализ также проводится экспертно.

Однако выявление неоднородностей изображения открытой поверхности почв может быть и автоматизированно (например, путем классификации отдельных изображений с использованием алгоритма ISODATA, пересечением всех полученных результатов классификации с последующим анализом устойчивости автоматизированно выделенных классов). Результатом этого этапа анализа является карта неоднородностей открытой поверхности почв.

На следующем этапе аналогичным образом проводится анализ неоднородностей изображения посевов. В качестве основы для выделения неоднородностей используется карта вегетационного индекса NDVI посевов в разные этапы вегетации и в разные годы.

На последнем этапе работ устойчивые неоднородности, выявленные по открытой поверхности почв, совмещаются (пересекаются) с устойчивыми неоднородностями посевов, в результате чего получается карта устойчивых неоднородностей почв поля. Эта карта рассматривается нами как карта неоднородностей почв поля по агрономически важным свойствам (АНП). Выделам карты при необходимости приписываются в качестве атрибутов конкретные лимитирующие свойства почв, для чего используется традиционная почвенная карта и/или результаты полевых обследований почв каждой из выделенных зон, а также результаты оценки качества почв (ранжирования почв по качеству), полученные на основе анализа поведения NDVI в каждом выделе. Эта информация также является результатом экспертной оценки.

Необходимо отметить, что на каждом конкретном поле в качестве лимитирующих выступают не все свойства почв, перечисленные в таблице 1, а лишь несколько из них. Какие конкретно свойства почв могут лимитировать возделывание сельскохозяйственных культур на конкретном поле, можно определить на ос-

нове анализа традиционно составленной почвенной карты или просто на основе знания специфики почвенного покрова региона.

Примеры использования предложенного подхода

На рисунке 3 приведены примеры контурной части карт АНП полей в сопоставлении с выделами традиционно составленных почвенных карт.

Из рисунка следует, что контурная часть карт сильно не совпадает. Карты АНП более детальны. Судя по данным рисунка, степень детальности зависит от пространственных неоднородностей агрономически важных свойств почв конкретного поля (большее варьирование свойств на поле “Меньково” и меньшее варьирование свойств на поле “Стрелецкое”).

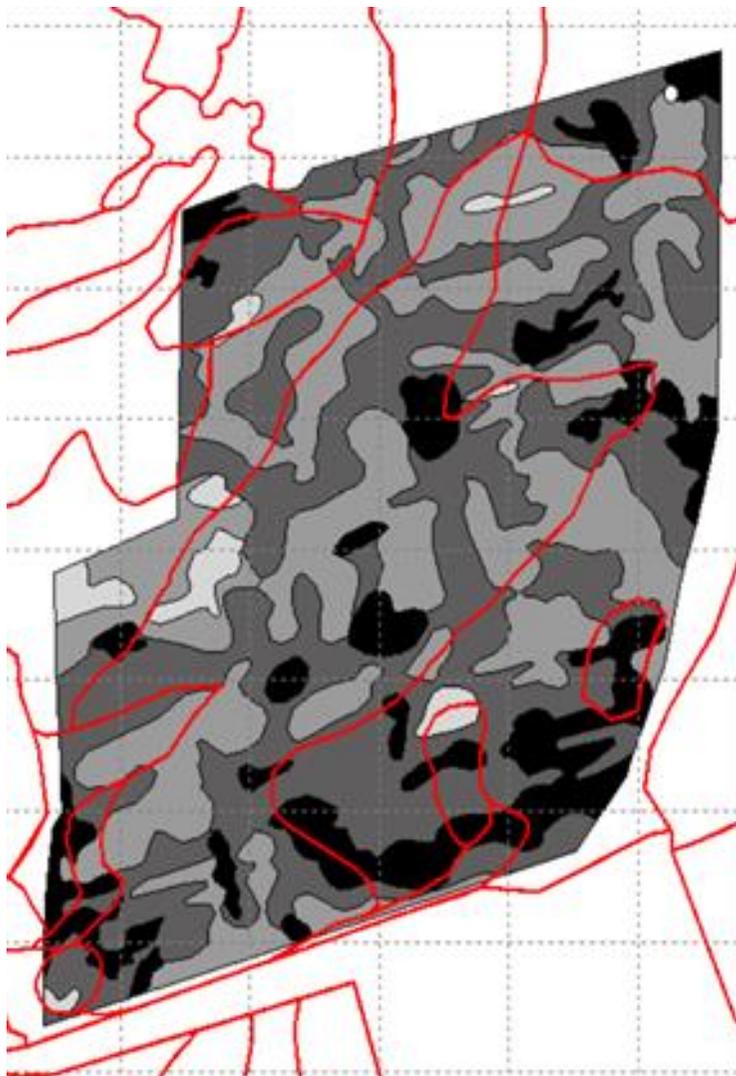
Выделам карт АНП поля нельзя приписать какое-либо классификационное наименование почвы, так как границы карты АНП не являются границами классификационных выделов почв. Они могут быть охарактеризованы лишь набором тех лимитирующих свойств почв, которые присутствуют в выделе. Таким образом карты АНП являются больше оценочными картами, чем чисто почвенными, и отражают зоны (участки) поля, которые однородны с точки зрения лимитирующих свойств почв и степени их влияния.

Карты АНП не рассматриваются в качестве замены традиционно составляемых почвенных карт. У этих карт разное целевое назначение. Традиционно составляемые почвенные карты предназначены для отражения географии почв того или иного региона в терминах принятой классификации почв и объектом их картографирования являются классификационные выделы почв ([Савин, 2016](#)).

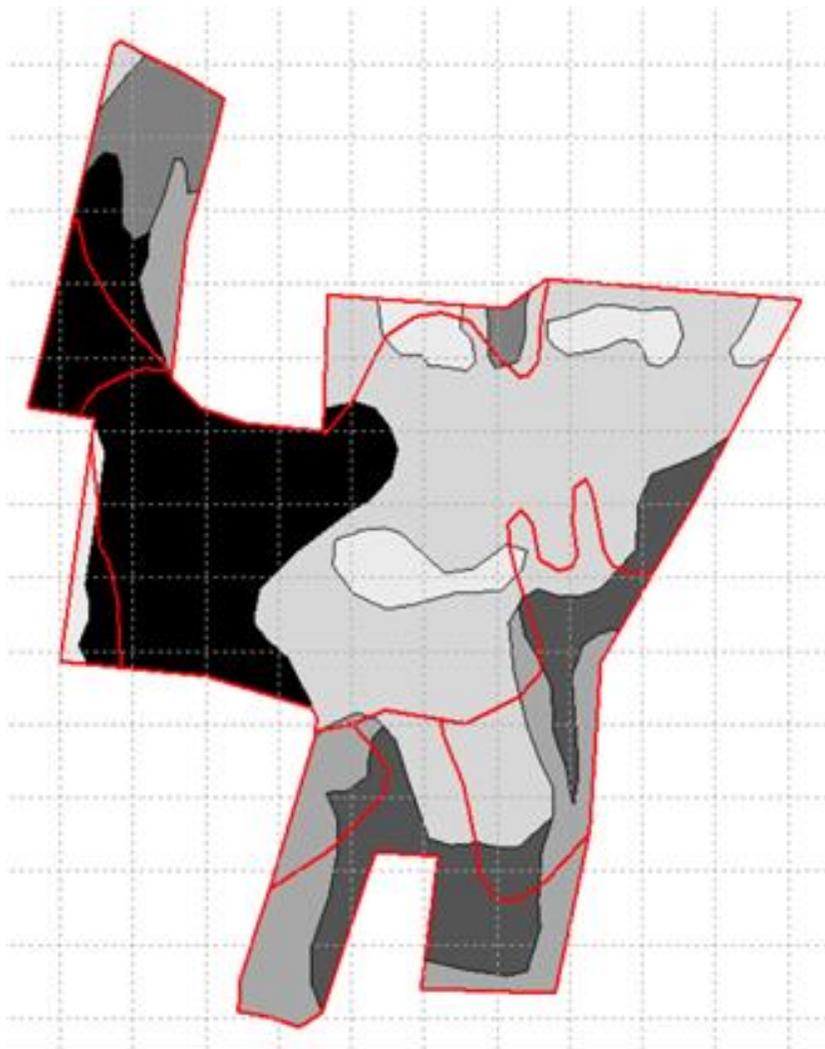
Эти карты являются обобщением и отражением текущего уровня знаний почвоведов о закономерностях географии почв того или иного региона или участка. В отличие от традиционно составляемых почвенных карт, карты АНП предназначены для решения прикладных задач сельскохозяйственного производства. Они являются прикладными, но создаются не путем анализа и оценки почв тех выделов, которые есть на почвенной карте (как это делается традиционно ([Ганжара и др., 1987](#))), а путем поиска про-

странственных неоднородностей воздействия лимитирующих свойств почв на посевы сельскохозяйственных культур на основе анализа данных дистанционного зондирования.

А



Б



В

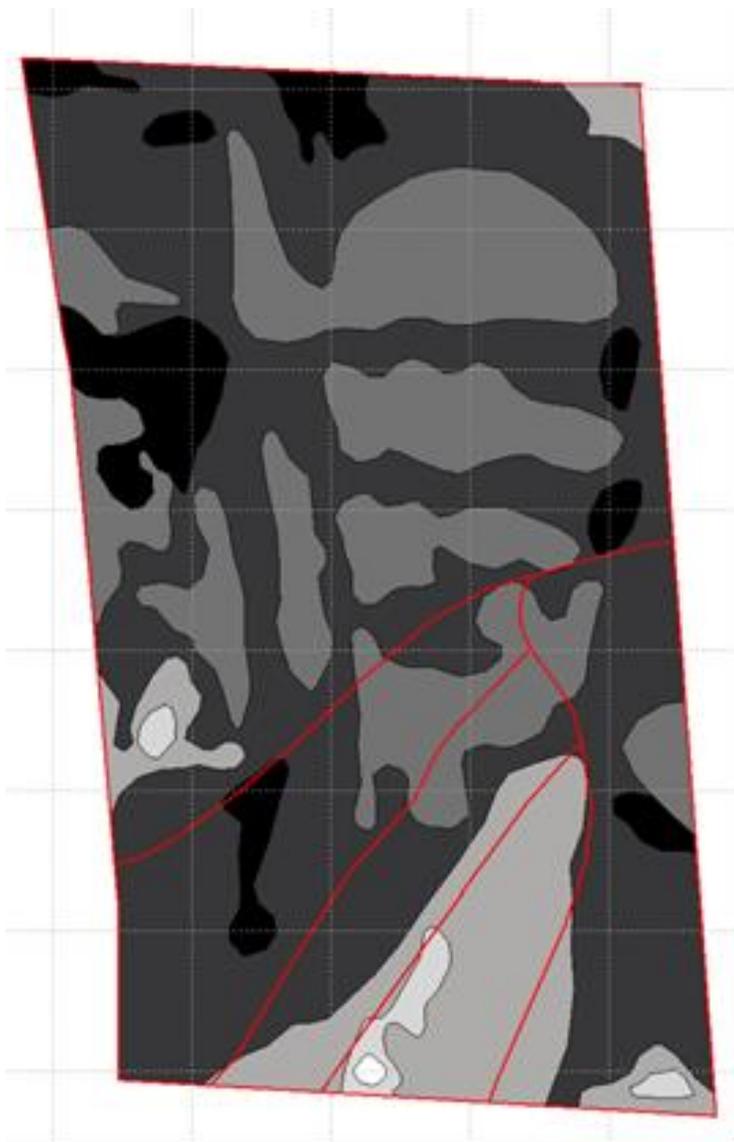


Рис. 3. Выделы карты АНП тестового поля “Меньково” (А), тестового поля “Стрелецкое” (Б) и тестового поля “Белокаменское” (В) (оттенки серого цвета) и границы выделов традиционно составленных почвенных карт (красные линии) (расстояние между серыми линиями грида – 100 м).

Fig. 3. ASSP (Agronomically Sound Soil Patterns) map sections of the Menkovo test field (A), Streletskoeye test field (B), and Belokamenskoye test field (C) (shades of gray) and boundaries of traditionally drawn soil maps (red lines) (distance between the gray grid lines is 100 m).

То есть в этом случае неоднородности почвенного покрова устанавливаются косвенно – по реакции на них посевов.

Подход к выделению этих зон подспудно учитывает и уровень хозяйствования. Те неоднородности почв, влияние которых на состояние посевов элиминируется какими-либо агротехническими мероприятиями, на картах АНП не отражаются. Таким образом, предложенный подход учитывает и специфику использования земель, тот севооборот и те агротехнологии, которые используются на конкретном земельном участке.

Анализ связи состояния посевов с неоднородностями почвенного покрова проводится уже давно ([Фридланд, 1972](#); [Прохова, Сорокина, 1975](#); [Прудникова, Савин, 2013](#)), но до сих пор не предлагалось использовать анализ состояния посевов как основу для картографирования агрономически важных свойств почв. В целом данный подход является развитием идей такого научного направления как индикационная геоботаника ([Викторов и др., 1962](#); [Маханова и др., 2010](#)), но применительно к сельскохозяйственной растительности.

Кроме того, предложенный подход близок к работам последних лет в области научного обоснования внедрения систем точного земледелия ([Maloku et al., 2020](#)). В рамках этих подходов также не используется традиционно созданная почвенная карта, а проводится анализ пространственной неоднородности посевов на поле (на основе датчиков, установленных на комбайнах ([Morais et al., 2021](#)) или в поле ([Placidi et al., 2021](#)), или с использованием данных дистанционного зондирования ([Савин, Блохин, 2022](#))),

который и служит основой для планирования агротехнических мероприятий и управлением плодородия почв поля.

В отличие от подходов точного земледелия, в предложенном подходе в основе анализа все же лежат почвенные свойства и их пространственное варьирование. Это позволяет учитывать весь набор лимитирующих свойств почв с учетом специфики их влияния на посевы разных культур и в разные сезоны вегетации. В рамках подходов точного земледелия обычно учитываются лишь те ограниченные свойства, которые могут быть измерены современными датчиками (влажность, электропроводность, плотность и некоторые другие ([Viscarra Rossel, Bouma, 2016](#))). Учитывается лишь состояние измеряемых свойств почв и посевов на момент измерения, без учета многолетней и сезонной динамики. Это связано с разницей в целеполагании этих подходов. В точном земледелии основная цель является более оперативной: выявить пространственные неоднородности и попытаться их быстро устранить (например, выровнять состояние посевов), то в предложенном нами подходе основная цель – это выявление неоднородностей, которые устойчивы во времени, чтобы их учитывать при использовании земельного участка. В перспективе эти подходы могут быть инкорпорированы в технологии точного земледелия, что позволит расширить функциональные возможности этих технологий.

Особенностью предложенного подхода является то, что в выделах карты АНП на данном этапе невозможно указать какой-то объект картографирования, так как объектом фактически является набор лимитирующих свойств почв и особенности их влияния на посевы. Поэтому основным тематическим наполнением карты является атрибутивная таблица к ней, в которой перечислены свойства и их лимитирующее воздействие. Карты АНП индивидуальны для каждого поля и должны обновляться (корректироваться) при смене специфики землепользования. Лишь при накоплении таких карт с атрибутивными данными можно будет перейти к классификации отраженных на картах объектов с целью получения прикладной классификации почв для сельскохозяйственных целей.

ВЫВОДЫ

Предложен новый подход к созданию карт, отражающих пространственное варьирование агрономически значимых свойств почв на поле. Предложенный подход позволяет более точно отражать неоднородности почвенного покрова поля, важные для сельскохозяйственного производства, чем традиционные подходы, что подтверждается сравнением выделов карт АНП с выделами традиционно составленных почвенных карт. Процесс выделения зон неоднородностей основан на анализе архивов спутниковых данных, что предопределяет его оперативность, точность и технологичность, а также возможности в перспективе его полной автоматизации.

Теоретически подход может использовать и архивы данных, получаемых с беспилотных летательных аппаратов, что еще больше повысит его точность. Но для этого необходимо накопление данных подобной съемки на территорию отдельных полей и проведение дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов С.В., Востокова Е.А., Вышивкин Д.Д.* Введение в индикационную геоботанику. М.: Наука, 1962. 232 с.
2. *Ганжара Н.Ф., Зайдельман Ф.Р., Кауричев И.С., Кашанский А.Д., Коротков А.А., Кочубей М.С., Крупеников И.А., Люжин М.Ф., Поддубный Н.Н.* Составление и использование почвенных карт. М.: Агропромиздат, 1987. 273 с.
3. *Докучаев В.В.* Итоги о русском черноземе // *Тр. Вольн. эконом. об-ва.* 1877. Т. 1. Вып. 4. С. 415–432.
4. *Кириянова Е.Ю., Савин И.Ю.* Неоднородность посевов, определяемая по спутниковым данным MODIS, как индикатор контрастности почвенного покрова // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук.* 2013. № 3. С. 36–39.
5. *Козубенко И.С.* Почвенная информация в аналитическом центре Минсельхоза России // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева.* 2018. Вып. 92. С. 3–15. DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-3-15](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-3-15).
6. *Маханова Г.С., Дурницкая М.С., Радаева Ю.Г.* Методы индикационных исследований в геоботанике // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета.* 2010. № 3 (27–1). С. 218–219.

7. Методическое руководство “Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий” / Под ред. *В.И. Кирюшина, А.Л. Иванова*. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2005. 794 с.
8. *Прохорова З.А., Сорокина Н.П.* Влияние компонентов элементарной структуры дерново-подзолистых почв на продуктивность сельскохозяйственных растений // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 1975. Вып. 8. С. 178–191.
9. *Савин И.Ю.* Классификация почв и земледелие // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. Вып. 84. С. 3–9. DOI: [10.19047/0136-1694-2016-84-3-9](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-3-9).
10. *Савин И.Ю.* Пространственные аспекты прикладного почвоведения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 101. С. 5–18. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-5-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18).
11. *Савин И.Ю.* Перспективы развития картографирования и мониторинга почв на основе интерполяции точечных данных и дистанционных методов // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2022. № 2. С. 13–19.
12. *Савин И.Ю., Блохин Ю.И.* Об оптимизации размещения сети датчиков интернета вещей на пахотных угодьях // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 22–50. DOI: [10.19047/0136-1694-2022-110-22-50](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-22-50).
13. *Савин И.Ю., Жоголев А.В., Прудникова Е.Ю.* Современные тренды и проблемы почвенной картографии // Почвоведение. 2019. № 5. С. 517–528.
14. *Савин И.Ю., Симакова М.С.* Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. № 9 (5). С. 104–115.
15. Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования / гл. ред. *Иванов А.Л.* М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. 350 с.
16. *Толтин В.А., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Савин И.Ю., Флитман Е.В.* Возможности информационного сервера СДМЗ АПК // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. № 7(2). С. 221–232.
17. *Фридланд В.М.* Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 423 с.
18. *A framework for land evaluation.* FAO Soils bulletin 32. Rome: FAO, 1976. 78 p.
19. *Asgari N., Ayoubi S., Demattê J.A.M., Jafari A., Safanelli J.L., Da*

- Silveira A.F.D.* Digital mapping of soil drainage using remote sensing, DEM and soil color in a semiarid region of Central Iran // *Geoderma Regional*. 2020. Vol. 22. e00302. DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00302](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00302).
20. *Becker-Reshef I., Justice C., Sullivan M., Vermote E., Tucker C., Anyamba A., Small J.* Monitoring global croplands with coarse resolution earth observations: the Global Agriculture Monitoring (GLAM) project // *Remote Sensing*. 2010. Vol. 2(6). P. 1589–1609. DOI: [10.3390/rs2061589](https://doi.org/10.3390/rs2061589).
21. *Bousbih S, Zribi M, Pelletier C, Gorrab A, Lili-Chabaane Z, Baghdadi N, Ben Aissa N, Mougenot B.* Soil Texture Estimation Using Radar and Optical Data from Sentinel-1 and Sentinel-2 // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11(13). 1520. DOI: [10.3390/rs11131520](https://doi.org/10.3390/rs11131520).
22. *Fischer H.S., Michler B., Ziche D., Fischer A.* Plants as Indicators of Soil Chemical Properties / *Wellbrock N., Bolte A.* (Eds) *Status and Dynamics of Forests in Germany // Ecological Studies*. 2019. Vol. 237. DOI: [10.1007/978-3-030-15734-0_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_10).
23. *Ge Y., Thomasson J., Sui R.* Remote Sensing of Soil Properties in Precision Agriculture: A Review // *Frontiers of Earth Science*. 2011. Vol. 5. P. 229–238. DOI: [10.1007/s11707-011-0175-0](https://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0).
24. *Gleason C.J., Durand M.T.* Remote Sensing of River Discharge: A Review and a Framing for the Discipline // *Remote Sens*. 2020. Vol. 12. 1107. DOI: [10.3390/rs12071107](https://doi.org/10.3390/rs12071107).
25. *Karjalainen V., Tokola T., Malinen J.* Prediction of topsoil stoniness using soil type information and airborne gamma-ray data // *Canadian Journal of Forest Research*. 2021. Vol. 52(1). P. 27–37. DOI: [10.1139/cjfr-2021-0001](https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0001).
26. *Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W.* Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. *Proc. of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*. 1969. P. 97–131.
27. *Lal R.* Societal value of soil carbon // *Journal of Soil and Water Conservation*. 2014. Vol. 69(6). P. 186A–192A. DOI: [10.2489/jswc.69.6.186Aa](https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.186Aa).
28. *Manikandan K., Pandian K., Mariappan S., Devi G.* Concepts on land evaluation // *e-Journal Earth Science India*. 2013. Vol. 6. P. 20–26.
29. *Maloku D., Balogh P., Bai A., Gabnai Z., Lengyel P.* Trends in scientific research on precision farming in agriculture using science mapping method // *International Review of Applied Sciences and Engineering IRASE*. 2020. Vol. 11 (3). P. 232–242. DOI: [10.1556/1848.2020.00086](https://doi.org/10.1556/1848.2020.00086).
30. *Morais R., Mendes J., Silva R., Silva N., Sousa J., Peres E.A.* Versatile, low-power and low-cost IoT device for field data gathering in precision agriculture practices // *Agriculture*. 2021. Vol. 11. P. 619.
31. *Oldfield E.E., Bradford M.A., Wood S.A.* Global meta-analysis of the

- relationship between soil organic matter and crop yields // SOIL. 2019. Vol. 5. P. 15–32. DOI: [10.5194/soil-5-15-2019](https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019).
32. *Placidi P., Morbidelli R., Fortunati D., Papini N., Gobbi F., Scorzoni A.* Monitoring soil and ambient parameters in the IoT precision agriculture scenario: An original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors // Sensors. 2021. Vol. 21. 5110. DOI: [10.3390/s21155110](https://doi.org/10.3390/s21155110).
33. *Qi Y., Qie X., Qin Q., Shukla M.K.* Prediction of soil calcium carbonate with soil visible-near-infrared reflection (Vis-NIR) spectral in Shaanxi province, China: soil groups vs. spectral groups // International Journal of Remote Sensing. 2021. Vol. 42:7. P. 2502–2516. DOI: [10.1080/01431161.2020.1854892](https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1854892).
34. *Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.J.* Soil structure as an indicator of soil functions: A review // Geoderma. 2018. Vol. 314. P. 122–137. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009).
35. *Serteser A., Kargıoğlu M., İçağa Y.* Vegetation as an Indicator of Soil Properties and Water Quality in the Akarçay Stream (Turkey) // Environmental Management. 2008. Vol. 42. P. 764–770. DOI: [10.1007/s00267-008-9165-8](https://doi.org/10.1007/s00267-008-9165-8).
36. *The Aims of Land Evaluation.* 2019. URL: <https://sunnypapers.com/the-aims-of-land-evaluation-land-evaluation-is-concerned-with-the-present-land-performance/>.
37. *Viscarra Rossel R.A., Bouma J.* Soil sensing: A new paradigm for agriculture // Agricultural Systems. 2016. Vol. 148. P. 71–74. DOI: [10.1016/j.agsy.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.001).
38. *Wang J, Peng J, Li H, Yin C, Liu W, Wang T, Zhang H.* Soil Salinity Mapping Using Machine Learning Algorithms with the Sentinel-2 MSI in Arid Areas, China // Remote Sensing. 2021. Vol. 13(2). 305. DOI: [10.3390/rs13020305](https://doi.org/10.3390/rs13020305).
39. *Wu B., Meng J., Li Q., Yan N., Du X., Zhang M.* Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's CropWatch system // International Journal of Digital Earth. 2014. Vol. 7(2). P. 113–137. DOI: [10.1080/17538947.2013.821185](https://doi.org/10.1080/17538947.2013.821185).

REFERENCES

1. Viktorov S.V., Vostokova E.A., Vyshivkin D.D., *Vvedenie v indikacionnyu geobotaniku* (Introduction to indicative geobotanic), Moscow: Nauka, 1962, 232 p.
2. Ganzhara N.F., Zajdel'man F.R., Kaurichev I.S., Kashanskij A.D., Korotkov A.A., Kochubej M.S., Krupenikov I.A., Lyuzhin M.F., Poddubnyj N.N., *Sostavlenie i ispol'zovanie pochvennyh kart* (Compilation

- and use of soil maps), Moscow: Agropromizdat, 1987, 273 p.
3. Dokuchaev V.V., Itogi o russkom chernozyome (Conclusions about Russian chernozem), *Tr. Vol'n. ekonom. ob-va*, 1877, Vol. 1, Iss. 4, pp. 415–432.
 4. Kir'yanova E.Yu., Savin I.Yu., Neodnorodnost' posevov, opredelyaemaya po sputnikovym dannym MODIS, kak indikator kontrastnosti pochvennogo pokrova (Heterogeneity of soil cover, detected based on MODIS data, as an indicator of soil patterns contrast), *Doklady Rossijskoj akademii sel'skohozyajstvennyh nauk*, 2013, No. 3, pp. 36–39.
 - 40.5. Kozubenko I.S., Soil information in the analytical center of the ministry of agriculture of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 92, pp. 3–15, DOI: [10.19047/0136-1694-2018-92-3-15](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-3-15).
 6. Mahanova G.S., Durnickaya M.S., Radaeva Yu.G., Metody indikacionnyh issledovanij v geobotanike (Methods of indicative investigations in geobotanic), *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2010, Vol. 3 (27-1), pp. 218–219.
 7. Kiryushina V.I., Ivanov A.L., *Metodicheskoe rukovodstvo "Agroekologicheskaya ocenka zemel', proektirovanie adaptivno-landshaftnyh sistem zemledeliya i agrotekhnologij"* (Methodical manual "Agro-ecological land evaluation, planning of landscape adaptive land use systems, and agrotechnologies"), Moscow: FGNU "Rosinformagrotekh", 2005, 794 p.
 8. Prohorova Z.A., Sorokina N.P., Vliyanie komponentov elementarnoj struktury dernovo-podzolistyh pochv na produktivnost' sel'skohozyajstvennyh rastenij (Influence of sod-podzolic soil structure patterns on crop productivity), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 1975, No. 8, pp. 178–191.
 9. Savin I.Yu., The classification of soils and agriculture, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 84, pp. 3–9, DOI: [10.19047/0136-1694-2016-84-3-9](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-84-3-9).
 10. Savin I.Yu., Spatial aspects of applied Soil Science, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, pp. 5–18, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-101-5-18](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18).
 11. Savin I.Yu., The trends of soil mapping and monitoring based on interpolation of point data and remote sensing methods, *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2022, Vol. 77, No. 2, pp. 62–66.
 12. Savin I.Yu., Blokhin Yu.I., On optimizing the deployment of an internet of things sensor network for soil and crop monitoring on arable plots, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 110, pp. 22–50, DOI: [10.19047/0136-1694-2022-110-22-50](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-22-50).
 13. Savin I.Yu., Zhogolev A.V., Prudnikova E.Yu., Sovremennye trendy i problemy pochvennoj kartografii (Modern trends and problems of soil cartography), *Pochvovedenie*, 2019, No. 5, pp. 517–528.
 14. Savin I.Yu., Simakova M.S., Sputnikovye tekhnologii dlya inventarizacii i monitoringa pochv v Rossii (Satellite technologies for soil inventory and

monitoring in Russia), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 9 (5), pp. 104–115.

15. Ivanov A.L., *Cifrovaya pochvennaya kartografiya: teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya* (Digital soil cartography: theoretical and experimental investigations), Moscow: Pochvennyj in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2012, 350 p.

16. Tolpin V.A., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Savin I.Yu., Flitman E.V., *Vozможности informacionnogo servera SDMZ APK* (Abilities of informative service SDMZ APK), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 7(2), pp. 221–232.

17. Fridland V.M., *Struktura pochvennogo pokrova* (The structure of the soil cover), Moscow: Mysl', 1972, 424 p.

18. *A framework for land evaluation*, FAO Soils bulletin 32, Rome: FAO, 1976, 78 p.

41.19. Asgari N., Ayoubi S., Demattê J.A.M., Jafari A., Safanelli J.L., Da Silveira A.F.D., Digital mapping of soil drainage using remote sensing, DEM and soil color in a semiarid region of Central Iran, *Geoderma Regional*, 2020, Vol. 22, e00302, DOI: [10.1016/j.geodrs.2020.e00302](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00302).

20. Becker-Reshef I., Justice C., Sullivan M., Vermote E., Tucker C., Anyamba A., Small J., Monitoring global croplands with coarse resolution earth observations: the Global Agriculture Monitoring (GLAM) project, *Remote Sensing*, 2010, Vol. 2(6), pp. 1589–1609, DOI: [10.3390/rs2061589](https://doi.org/10.3390/rs2061589).

21. Bousbih S., Zribi M., Pelletier C., Gorrab A., Lili-Chabaane Z., Baghdadi N., Ben Aissa N., Mougénot B., Soil Texture Estimation Using Radar and Optical Data from Sentinel-1 and Sentinel-2, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(13), 1520, DOI: [10.3390/rs11131520](https://doi.org/10.3390/rs11131520).

22. Fischer H.S., Michler B., Ziche D., Fischer A., Plants as Indicators of Soil Chemical Properties, In: Wellbrock N., Bolte A. (Eds) *Status and Dynamics of Forests in Germany*, *Ecological Studies*, 2019, Vol. 237, DOI: [10.1007/978-3-030-15734-0_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_10).

23. Ge Y., Thomasson J., Sui R., Remote Sensing of Soil Properties in Precision Agriculture: A Review, *Frontiers of Earth Science*, 2011, Vol. 5, pp. 229–238, DOI: [10.1007/s11707-011-0175-0](https://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0).

24. Gleason C.J., Durand M.T., Remote Sensing of River Discharge: A Review and a Framing for the Discipline, *Remote Sens.*, 2020, Vol. 12, 1107, DOI: [10.3390/rs12071107](https://doi.org/10.3390/rs12071107).

42.25. Karjalainen V., Tokola T., Malinen J., Prediction of topsoil stoniness using soil type information and airborne gamma-ray data, *Canadian Journal of Forest Research*, 2021, Vol. 52(1), pp. 27–37, DOI: [10.1139/cjfr-2021-0001](https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0001).

26. Krieglér F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W., Preprocessing

- transformations and their effects on multispectral recognition, *Proc. of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1969, pp. 97–131.
- 43.27. Lal R., Societal value of soil carbon, *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, Vol. 69(6), pp. 186A–192A, DOI: [10.2489/jswc.69.6.186Aa](https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.186Aa).
28. Manikandan K., Pandian K., Mariappan S., Devi G., Concepts on land evaluation, *e-Journal Earth Science India*, 2013, Vol. 6, pp. 20–26.
29. Maloku D., Balogh P., Bai A., Gabnai Z., Lengyel P., Trends in scientific research on precision farming in agriculture using science mapping method, *International Review of Applied Sciences and Engineering IRASE*, 2020, Vol. 11(3), pp. 232–242, DOI: [10.1556/1848.2020.00086](https://doi.org/10.1556/1848.2020.00086).
30. Morais R., Mendes J., Silva R., Silva N., Sousa J., Peres E.A., Versatile, low-power and low-cost IoT device for field data gathering in precision agriculture practices, *Agriculture*, 2021, Vol. 11, 619.
31. Oldfield E.E., Bradford M.A., Wood S.A., Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields, *Soil*, 2019, Vol. 5, pp. 15–32, DOI: [10.5194/soil-5-15-2019](https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019).
32. Placidi P., Morbidelli R., Fortunati D., Papini N., Gobbi F., Scorzoni A., Monitoring soil and ambient parameters in the IoT precision agriculture scenario: An original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors, *Sensors*, 2021, Vol. 21, 5110, DOI: [10.3390/s21155110](https://doi.org/10.3390/s21155110).
33. Qi Y., Qie X., Qin Q., Shukla M.K., Prediction of soil calcium carbonate with soil visible-near-infrared reflection (Vis-NIR) spectral in Shaanxi province, China: soil groups vs. spectral groups, *International Journal of Remote Sensing*, 2021, Vol. 42:7, pp. 2502–2516, DOI: [10.1080/01431161.2020.1854892](https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1854892).
34. Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.J., Soil structure as an indicator of soil functions: A review, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, pp. 122–137, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009).
44. 35. Serteser A., Kargoğlu M., Içağa Y. Vegetation as an Indicator of Soil Properties and Water Quality in the Akarçay Stream (Turkey), *Environmental Management*, 2008, Vol. 42, pp. 764–770, DOI: [10.1007/s00267-008-9165-8](https://doi.org/10.1007/s00267-008-9165-8).
36. *The Aims of Land Evaluation*, 2019, URL: <https://sunnypapers.com/the-aims-of-land-evaluation-land-evaluation-is-concerned-with-the-present-land-performance/>.
37. Viscarra Rossel R.A., Bouma J., Soil sensing: A new paradigm for agriculture, *Agricultural Systems*, 2016, Vol. 148, pp. 71–74, DOI: [10.1016/j.agsy.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.001).
38. Wang J, Peng J, Li H, Yin C, Liu W, Wang T, Zhang H., Soil salinity mapping using machine learning algorithms with the Sentinel-2 MSI in arid

areas, China, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13(2), Vol. 305, DOI: [10.3390/rs13020305](https://doi.org/10.3390/rs13020305).

39. Wu B., Meng J., Li Q., Yan N., Du X., Zhang M. Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's CropWatch system, *International Journal of Digital Earth*, 2014, Vol. 7(2), pp. 113–137, DOI: [10.1080/17538947.2013.821185](https://doi.org/10.1080/17538947.2013.821185).